

Ein Fuzzy-Control geführtes Lüftungssystem für Niedrigenergie- und Passivhäuser

**Dr. Christiane Kettner und Willi Schmidt,
Ritter Energie-und Umwelttechnik
76307 Karlsbad-Langensteinbach**

1. Einleitung

Die hier vorgetragenen Ergebnisse entstanden im Rahmen des BMWF-geförderten Projekts „Simulationsbasierter Entwurf von bedarfsgeführten Lüftungssystemen in solar passiven Häusern“ innerhalb einer Kooperation der Ritter Energie-und Umwelttechnik GmbH&Co. KG mit dem Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau der Universität Karlsruhe.

Ziel des Projekts war es, eine bedarfsgeführte Fuzzy-Regelung für Lüftungsanlagen in privaten Wohnhäusern zu entwickeln, welche die Lüftungswärmeverluste minimiert, gleichzeitig den Wohnkomfort steigert und die Bausubstanz schont, indem überhöhte Feuchten in allen Räumen verhindert werden.

Dieses Ziel ist zu einer interessanten Fragestellung geworden, seit mit zunehmendem Dämmstandard privater Wohnhäuser der Lüftungswärmebedarf immer größere Bedeutung erlangt¹ und andererseits die natürliche Belüftung durch Zugluft nicht mehr ausreicht, um die hygienisch nötige Frischluft zuzuführen sowie überschüssige Feuchte abzuführen.

Die entwickelte Lüftungsregelung besteht aus einem Feuchtesensor, einem Kohlendioxid- oder Multigassensor, mehreren Temperatursensoren sowie der Regelungsplatine mit Microcontroller, der mittels Fuzzy-Logik die gemessenen Eingangswerte verarbeitet zu einem Stellsignal für die Ventilatoren.

Die sog. Fuzzy-Logik (übersetzt „unscharfe Logik“) eignet sich gut für solche Regelungsaufgaben, bei denen menschliches Empfinden und Entscheiden nachgebildet werden soll und Zielkonflikte aufgelöst werden müssen. Nebenbei verhindert sie, dass fluktuierende Eingangsgrößen sich in fluktuierenden Ausgangsgrößen niederschlagen. Diese Merkmale qualifizieren die Fuzzy-Logik besonders für den Einsatz in der Gebäudetechnik.

2. Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Logik wurde eingeführt durch L.A.Zadeh, der 1965 einen Artikel mit dem Titel „Fuzzy Sets“ in „Information and Control“ veröffentlichte [1]. Seither gibt es zahlreiche Anwendungen in der Signalverarbeitung, Zeitreihenvorhersage, Datenbankverwaltung, Regelungstechnik etc.

Vorerst eine kurze Definition von Fuzzy-Sets: Fuzzy-Sets sind linguistische Terme wie z.B. „trocken“. Wenn es nun eine Reihe von Feuchte-Messwerten x gibt, wie stellt man dann fest, welcher Wert zu „trocken“ gehört und welcher nicht? Ein klassisches Set A kann einfach definiert werden als $A = \{x | x < 40\%\}$ und damit ist klar, dass alle Messwerte unter 40% dazugehören, alle anderen nicht.

¹Er erreicht z.B. bei nach dem Standard der EnEV 2002 gebauten Gebäuden ohne Lüftungsanlage mit Wärmegewinnung bereits 50% der gesamten Wärmeverluste.

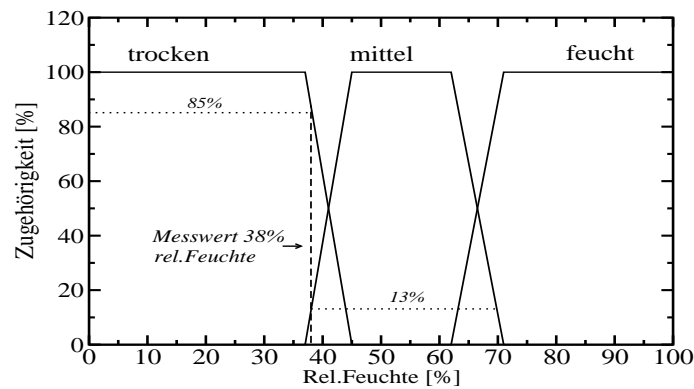


Abbildung 1: Beispiel für Zugehörigkeitsfunktionen zu den Fuzzy-Sets der relativen Feuchte' Für einen Messwert von 38% relativer Feuchte sind die Zugehörigkeiten zu den Sets „trocken“ und „mittel“ eingezeichnet.

Fuzzy-Sets sind dagegen Sets ohne eine scharfe Grenze, d.h. der Übergang von „dazugehören“ zu „nicht dazugehören“ ist fließend. Die Zugehörigkeit wird deshalb durch Funktionen beschrieben. Das Fuzzy-Set „trocken“ kann folgendermaßen definiert werden: Wenn X eine Menge ist mit Feuchtwerten x , dann ist das Fuzzy-Set „trocken“ definiert als eine Menge geordneter Wertepaare: „trocken“ = $\{(x, \mu_{trocken}(x)) | x \in X\}$.

Dabei ist $\mu_{trocken}(x)$ die Zugehörigkeitsfunktion von x zu „trocken“. Diese Funktion bildet jedes Element von X ab auf einen kontinuierlichen Zugehörigkeitsgrad zwischen 0 und 100%. Es gibt demnach Messwerte, die zu 100% zu „trocken“ gehören, und andere, die zu 15% dazugehören, wieder andere haben eine Zugehörigkeit von 0%.

Die Zugehörigkeitsfunktionen sind meist dreieckig oder trapezförmig (siehe Abbildung 1 und 2), verwendet werden auch Gauss-Kurven oder allgemeine Glockenfunktionen.

Es gibt viele Varianten von sog. Fuzzy-Controllern, die für Regelungsaufgaben eingesetzt werden. Bei den meisten zerfällt der Arbeitsablauf in drei Schritte: die Fuzzifizierung der Eingangsgrößen, die Inferenz sowie die Defuzzifizierung der Ausgangsgröße. Diese Schritte werden im Folgenden erläutert. Da wir hierbei hauptsächlich auf die praktische Anwendung der Fuzzy-Sets eingehen wollen, sei dem an mathematischen Hintergründen interessierten Leser der Artikel von J.R. Jang und C.-T. Sun empfohlen [2].

2.1 Fuzzifizierung

Im diesem Schritt wird für die zu verarbeitenden scharfen Eingangswerte der Zugehörigkeitsgrad zu den Fuzzy-Sets bestimmt. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Sets zur relativen Feuchte. Für jeden Messwert der relativen Feuchte kann hier die Zugehörigkeit von 0..100% zu den drei Fuzzy-Sets „trocken“, „mittel“ und „feucht“ abgelesen werden. Man beachte, dass die Zugehörigkeitsfunktionen keine Wahrscheinlichkeitsverteilungen darstellen, d.h. sie sind nicht über ein Integral normiert, sondern über die Maximums-Norm: Die größtmögliche Zugehörigkeit ist 100%. Allerdings müssen sich die Zugehörigkeiten eines Eingangswerts zu allen Fuzzy-Sets dieser Eingangsgröße nicht zu 100% summieren.

Durch die Fuzzifizierung wird demnach eine Information wie „Luftfeuchte 15%“ umgewandelt in eine unscharfe Aussage wie „Die Luft ist trocken“. Dabei geht keine für den Regelungsprozess

wesentliche Information verloren, wie man am Beispiel des in Abbildung 1 eingezeichneten Messwerts von 38% relativer Luftfeuchte sieht: Dieser Wert gehört zu 85% zum Fuzzy-Set trocken und zu 13% zum Set „mittelfeucht“. Damit ist er eindeutig bestimmt. Im Design der Zugehörigkeitsfunktionen steckt Expertenwissen, denn sowohl die Gestalt, die Breite als auch der Überlapp der einzelnen Sets haben Einfluss auf die Regelcharakteristik.

2.2 Interferenz

Beim zweiten Schritt - der Interferenz - kommt die Regelbasis ins Spiel. Sie enthält beliebig viele Regeln, die über mehrere Prämissen und eine Folgerung verfügt. Die Struktur ist

WENN Prämissen 1 UND Prämissen 2 UND ...UND Prämissen n DANN Folgerung.

Dabei gibt es maximal soviele Prämissen wie Eingangsgrößen. In den Prämissen werden die linguistischen Terme angesprochen statt der scharfen Eingangsgrößen. Eine Prämisse kann z.B. lauten „die Luft ist trocken“. Der WENN-Operator gibt dabei den Zugehörigkeitsgrad der gemessenen Eingangsgröße zum entsprechenden Fuzzy-Set zurück. Dieser Wert steht nun für den Erfüllungsgrad der Prämisse.

Für die Definition der UND-Operatoren gibt es mehrere Möglichkeiten, z.B. die Multiplikation oder das Minimum der Erfüllungsgrade aller Prämissen einer Regel. Wir haben die Minimums-Regel angewendet, d.h. der Erfüllungsgrad der am schlechtesten erfüllten Prämisse wird zum Erfüllungsgrad der ganzen Regel.

Was die Art der Folgerung angeht, so können drei Grundtypen von Fuzzy-Controllern unterschieden werden:

Typ 1: Jede Folgerung ist eine monoton ansteigende Funktion der Ausgangsgröße mit dem Wertebereich 0..100%. Diese Funktion wird auf der Höhe des Erfüllungsgrads der Prämisse der Regel horizontal geschnitten. Der x-Wert des Schnittpunkts ist das Ergebnis der Regel.

Typ 2: Jede Folgerung ist selbst wieder ein Fuzzy-Set mit einer Zugehörigkeitsfunktion, welche die Zugehörigkeit der Ausgangsgröße zu einem linguistischen Term beschreibt. Wir haben für die Lüftungsregelung diesen Typ verwendet, da hier die Folgerungen sehr einfach und intuitiv gewählt werden können. Abbildung 2 zeigt als Beispiel die Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Sets für die Lüftungsstärke in 0 bis 100% der vorgegebenen maximalen Lüftungsstärke. Warum der Wertebereich unterhalb von 0 % beginnt und oberhalb der 100% endet, wird später klar.

Beim Auswerten einer Regel wird die Zugehörigkeitsfunktion des Fuzzy-Sets der Folgerung horizontal abgeschnitten auf der Höhe des Erfüllungsgrads der Regel.²

Typ 3: Dieser Typ wird auch als Takagi-Sugeno-Typ bezeichnet. Hier ist die Folgerung jeder Regel eine lineare Funktion der Eingangsvariablen plus einem konstanten Term.

Um an das praktische Beispiel von Abbildung 1 und 2 anzuknüpfen, formulieren wir entsprechende Typ 2-Regeln:

Regel 1: WENN Feuchte niedrig UND Luftqualität mittel DANN schwach lüften.

²Je nach Art der Zugehörigkeitsfunktionen wird auch manchmal die evtl. einfachere Methode angewendet, den y-Wert des Maximums des Fuzzy-Sets auf den Erfüllungsgrad der Regel herunterzusetzen.

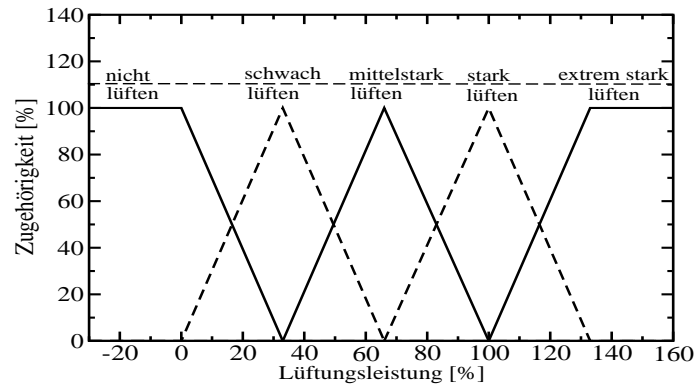


Abbildung 2: Beispiel für Zugehörigkeitsfunktionen von Fuzzy-Sets der Ausgangsgröße bei Fuzzy-Controller Typ 2. Hier wurde als Ausgangsgröße die Lüftungsleistung in Prozent eines Maximalwerts gewählt.

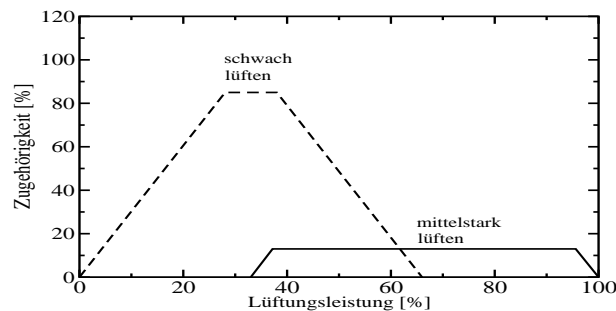


Abbildung 3: Abgeschnittene Fuzzy-Sets der Lüftungsleistung aus Abbildung 2.

Regel 2: WENN Feuchte mittel UND Luftqualität mittel DANN mittelstark lüften.

Wir nehmen an, die Luftqualität habe eine Zugehörigkeit von 100% zum entsprechenden Fuzzy-Set „mittel“. Dann hat Regel 1 einen Gesamt-Erfüllungsgrad von 85%, da der Feuchtemesswert von 38% eine Zugehörigkeit von 85% zum Feuchte-Fuzzy-Set „trocken“ hat (siehe Abbildung 1). Entsprechend wird die Zugehörigkeitsfunktion des Fuzzy-Set der Folgerung, hier „schwach lüften“, auf einer Höhe von 85% abgeschnitten (siehe Abbildung 3).

Regel 2 hat einen Gesamt-Erfüllungsgrad von 13%, da der Feuchtemesswert von 38% eine Zugehörigkeit von 13% zum Feuchte-Fuzzy-Set „mittel“ hat (siehe Abbildung 1). Folglich wird die Zugehörigkeitsfunktion der Folgerung „mittelstark lüften“ auf einer Höhe von 13% abgeschnitten (siehe Abbildung 3).

Auch in der Regelbasis steckt Expertenwissen über das zu regelnde System, deshalb werden Fuzzy-Systeme auch als wissensbasierte Systeme bezeichnet.

2.3 Defuzzifizierung

Typ 1: Bei diesem Typ liefert jede Regel schon ein scharfes Ergebnis, deshalb ist der scharfe Ausgangswert einfach der mit den Erfüllungsgraden der Regeln gewichtete Mittelwert der Ergebnisse aller Regeln.

Typ 2: Hier wird zuerst die einhüllende Kurve aller abgeschnittenen Zugehörigkeitsfunktionen gebildet (siehe Abbildung 3). Dies ist die Zugehörigkeitsfunktion des Fuzzy-Ausgangs-Sets. Durch das Bilden der einhüllenden Kurve wird sichergestellt, dass keins der Fuzzy-Sets aus den Folgerungen mehrfach zum Fuzzy-Ausgangs-Set beitragen kann. Der scharfe Ausgangswert wird meist errechnet als der Flächenschwerpunkt der Zugehörigkeitsfunktion des Fuzzy-Ausgangs-Sets, alternativ wird auch der Mittelwert aller Maxima der abgeschnittenen Zugehörigkeitsfunktionen der Folgerungs-Fuzzy-Sets genommen.

Typ 3: Hier wird, wie beim Typ 1, der gewichtete Mittelwert über die Ergebnisse aller Regeln als Ausgangswert verwendet. Der Takagi-Sugeno-Typ eignet sich gut für adaptive Fuzzy-Systeme (Neuro-Fuzzy), da hier die Fuzzy-Sets unverändert bleiben können und stattdessen die Parameter der Folgerungs-Funktionen variiert werden können.

In unserem Beispiel zum Typ 2 liegt der Flächenschwerpunkt der einhüllenden Kurve bei etwa 39% Lüftungsrate (siehe Abbildung 3).

2.4 Der Fuzzy-Controller vom Typ 2

Dieser Typ ist sehr gut für Regelungsaufgaben verwendbar, bei denen es um die Nachbildung menschlichen Empfindens geht. Denn hier können nicht nur die Eingangs- sondern auch die Ausgangsgrößen mittels linguistischer Terme formuliert werden, die man entsprechend der allgemeinen menschlichen Einschätzung wählen kann. Auch die Regelbasis ist so leicht zu formulieren.

Jede Regel kann eine Prämisse für jede Eingangsgröße enthalten, dann treffen immer nur wenige Regeln zu. Es kann aber auch eine Regel unter mehreren anderen geben, die lautet:

WENN Feuchte hoch DANN extrem stark lüften

Da bei dem Set „extrem stark lüften“ in unserem Fall der Schwerpunkt weit jenseits von 100% Lüftungsstärke liegt, zieht es bei der Defuzzifizierung den Flächenschwerpunkt der Einhüllenden in jedem Fall auch auf 100% Lüftungsstärke oder mehr³, unabhängig davon was die anderen Regeln ergeben haben. So wird bei überhöhter Feuchte immer maximal gelüftet, unabhängig von der Luftqualität und der Temperatur.

3. Das Fuzzy-Control geführte Lüftungssystem

Wir haben einen Typ 2-Fuzzy-Controller verwendet, um eine Wohnraum-Lüftungsanlage mit Zu- und Abluftventilator und Wärmerückgewinnungseinheit zu regeln. Die Fuzzy-Eingangsgrößen sind die relative Luftfeuchte, die Luftqualität (Kohlendioxid-Gehalt oder Multigas-Konzentration) und die Temperatur, jeweils gemessen im Sammelrohr der Abluft aller Ablufträume. Zusätzlich wird für den Fuzzy-Controller noch die Zulufttemperatur verwendet. Für die Entfrosterereinheit wird die Fortlufttemperatur gemessen, sowie für die Umschaltung von Winter-auf Sommerbetrieb die Aussentemperatur. Die Unterscheidung von Winter-und Sommerbetrieb dient u.A. der intelligenteren Steuerung der Bypassklappe der Wärmerückgewinnung, die bewirkt, dass einerseits im Sommer frühzeitig der Überhitzung der Räume entgegengewirkt wird, andererseits im Winter möglichst lange solare Gewinne mitgenommen werden können.

³Natürlich wird abschließend das Ergebnis des Fuzzy-Controller-Aufrufs wieder begrenzt auf den Wertebereich 0% bis 100% Lüftungstärke.

Der Fuzzy-Controller berechnet die optimale Lüftungsrate, um die Raumluft weder zu trocken noch zu feucht zu halten und möglichst bei guter oder mittlerer Luftqualität. Ausserdem wird bei zu warmer Abluft, aber ausreichend kühler Zuluft die Lüftungsrate zu Kühlungs Zwecken erhöht.. Es können Zielkonflikte auftreten, wie z.B. bei schlechter, aber zu trockener Luft, die durch die Fuzzy-Logik gut aufgelöst werden.

Dem Fuzzy-Controller vorgeschaltet ist eine Modifikation der gemessenen Eingangswerte. Dies hat drei Gründe:

1. Messwerte können je nach Jahreszeit verschieden beurteilt werden: So ist zum Beispiel im Winterbetrieb, d.h. in der Heizperiode niedrige relative Luftfeuchte ein Problem, aber im Sommer muss dieser Umstand nicht berücksichtigt werden.
2. Der Bewohner kann eine persönliche Gewichtung einbringen, je nachdem ob er die Anlage eher energiesparend oder eher komfortabel betreiben will. An der Fernbedienung gibt es einen Schiebeschalter, mit dem von 0 (max. Ökonomie) bis 100% (maximaler Komfort) in 7 Stufen die persönliche Gewichtung eingestellt werden kann. Die Fuzzy-Sets für die Eingangsgrößen sind für den Fall maximaler Komfort ausgelegt (nach Komforttheorie, aber auch energetisch optimiert). Bei anderer Einstellung des Schiebeschalters werden die gemessenen Eingangswerte vor Aufruf des Fuzzy-Controllers verschoben, so dass der aktuelle Raumluftzustand weniger „streng“ beurteilt wird, d.h. eine etwas schlechtere Luftqualität, höhere Feuchte und höhere Temperatur gelten noch als akzeptabel. Dadurch reduzieren sich automatisch die mittleren Lüftungsraten. Allerdings wird auch bei der Einstellung „maximale Ökonomie“ solange mit voller Stärke gelüftet, wie schlechte Luft oder überhöhte Feuchte dies nötig machen.
3. Es hat sich herausgestellt, dass die Feuchtekontrolle in einzelnen Räumen schwierig ist, wenn die Feuchte nur zentral in der Abluft gemessen wird. Denn wenn die Wohnungsluft insgesamt eher trocken ist, im Bad aber durch Duschen sehr feuchte Luft vorherrscht, dann steigt die Feuchte in der gemeinsamen Abluft oft nicht bis in den Bereich, in dem maximale Lüftung ausgelöst würde. Das ist aber notwendig, um überhöhte Feuchten möglichst schnell zu reduzieren und so Schimmelbildung und verstärktes Milbenwachstum zu vermeiden. Deshalb wurde dem Fuzzy-Controller ein Peak-Erkennungsalgorithmus vorgeschaltet, der die Steigung der Feuchtekurve beobachtet und auf die für den Feuchteanstieg beim Duschen oder Baden charakteristische Form hin untersucht. Wird ein solches Ereignis erkannt, dann wird für eine halbe Stunde nach Überschreiten des Feuchte-Maximums der gemessene Feuchtwert soweit verstärkt, dass das Fuzzy-Set „feucht“ erreicht wird. Dadurch wird Lüftung mit voller Stärke ausgelöst.

Sowohl die Fuzzy-Sets als auch die Regeln wurden auf maximale Energieeinsparung bei größtmöglichem Komfort optimiert. Da hierfür die Betrachtung längerer Zeiträume nötig war, wurde die Simulationssoftware „ColSim“ hinzugezogen, welche eine genaue und energetisch bilanzierte Abbildung des Gebäudes in sehr kleinen Zeitschritten erlaubt. Wegen des frei zugänglichen Quellcodes von „ColSim“ (Ansi C) war es möglich, die Simulationssoftware an die speziellen Bedingungen des Lüftungskreislaufs anzupassen, die Fuzzy-Regelungssoftware innerhalb der Simulationsumgebung zu entwickeln und anschließend als eigenständiges Programm zu exportieren. Dieses wurde dann auf Microcontroller umgesetzt und im Feldtest erprobt. Hier ergaben sich weitere kleine Änderungen.

Die Lüftungsregelung hat inzwischen mehrere Feldtests durchlaufen und hat sich sehr gut bewährt. Abgesehen von zeitweisen Problemen mit der Kalibrierung des Multigas-Sensors haben alle Feldtest-Teilnehmer gute Noten für die neue bedarfsgeführte Regelung vergeben.

Die Simulationsrechnungen zeigen ausserdem, dass es auch bei sehr gut gedämmten Häusern mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung immer noch ein Einsparpotential gibt: Mit der bedarfsgeführten Fuzzy-Regelung können mit der Einstellung „max. Ökonomie“ im Vergleich zur konventionellen Drei-Stufen-Regelung auf Stufe „Normal“ im Passivhaus bis zu 16 % der für Heizung und Lüftung verbrauchten Primärenergie eingespart werden, bei gleichzeitiger deutlicher Verbesserung des Komforts und Vermeidung überhöhter Feuchten.

[1] L.A.Zadeh. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8:338-353,1965.

[2] J.R.Jang,C.-T.Sun. Neuro-Fuzzy Modeling and Control. *Proceedings of the IEEE*, 1995.